



引文格式: 郭培虹, 耿涛, 冯治汉, 等. 基于地球物理场的华阳川铀矿区深部构造特征及其深部找矿潜力[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 182–190. DOI: 10.12401/j.nwg.2023120

Citation: GUO Peihong, GENG Tao, FENG Zhihan, et al. Deep Structural Characteristics and Prospecting Potential of Huayangchuan Uranium Deposit Based on Geophysical Field[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 182–190. DOI: 10.12401/j.nwg.2023120

## 基于地球物理场的华阳川铀矿区深部构造特征及其深部找矿潜力

郭培虹, 耿涛\*, 冯治汉, 唐小平, 齐琦

(中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 华阳川铀多金属矿的勘查工作近年来取得了较大进展, 基本查明了浅部矿体的分布情况。然而, 由于北秦岭华阳川地区深部构造发育, 地形复杂, 前期缺乏对深部构造特征的研究, 制约了该区深部找矿突破。笔者通过航空重、磁及地面电磁剖面工作, 结合已有的地质资料, 对华阳川铀多金属矿区的深部构造特征进行了全面分析。研究结果显示, 华阳川韧性剪切带的深部延伸为铀源的迁移和迁出提供了重要的通道。同时, 华山岩体具有铀源迁出特征, 其在华阳川矿区北界面变缓, 呈现出“靠椅”状的形态, 这种地质结构有利于铀源的富集和就位。基于以上, 认为华阳川铀矿区深部至少 1 500 m 内仍具有寻找铀矿的巨大潜力。

**关键词:** 华阳川铀多金属矿; 地球物理场; 深部构造; 找矿潜力

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)04-0182-09

### Deep Structural Characteristics and Prospecting Potential of Huayangchuan Uranium Deposit Based on Geophysical Field

GUO Peihong, GENG Tao\*, FENG Zhihan, TANG Xiaoping, QI Qi

(Xi'an Center of China Geological Survey / Geosciences Innovation Center of Northwest China, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

**Abstract:** In recent years, significant progress has been achieved in the exploration of Huayangchuan uranium polymetallic ore, and the distribution of shallow ore bodies has been mainly identified. However, the deep tectonic development and complex terrain of the Huayangchuan area in the North Qinling Mountains, as well as a lack of early research on the characteristics of the deep tectonics, have restricted the deep prospecting break-

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-09-21; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家重点研发计划“典型覆盖区航空地球物理技术示范与处理解释软件平台开发”所属课题“北秦岭华阳川地区隐伏铀矿空-地-井协同勘查技术示范研究”(2017YFC0602205), 中国地质调查局项目“全国镍钴矿战略性矿产调查”(DD20240128)、“阿勒泰地区富蕴县喀拉通克外围综合物探”(DD20243563), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“甘肃北山马鬃山地区基性岩墙群构造意义研究”(2022JQ-272)联合资助。

作者简介: 郭培虹(1984-), 女, 高级工程师, 主要从事重磁数据处理、反演和解释工作。E-mail: gph\_1984@126.com。

\* 通讯作者: 耿涛(1969-), 男, 正高级工程师。主要从事区域地球物理调查和矿产地球物理勘查以及地球物理应用技术研究方面的工作。E-mail: gengtao926@163.com。

through in this area. Based on available geological data, a comprehensive analysis has been conducted on the deep structural characteristics of the Huayangchuan uranium polymetallic mining area. The study reveals that the deep extension of the Huayangchuan ductile shear zone provides crucial pathways for the migration and emplacement of uranium sources. Furthermore, the contact of the Huashan rock body on the northern side of the mining area exhibits a gentle gradient, forming a "chair-like" morphology, which favors the enrichment of uranium sources. Based on these findings, it is believed that there is significant potential for uranium ore exploration within at least 1,500 meters of depth in the Huayangchuan uranium mining area.

**Keywords:** Huayangchuan uranium polymetallic deposit; geophysical field; deep geological structure; prospecting potential

华阳川硬岩型铀多金属矿位于华北地块与秦岭造山带接触部位的小秦岭构造带,夹持在老牛山花岗岩体和华山花岗岩体之间的太华群内,呈NW-SE向分布,是一个以铀、钼、铅为主的超大型多金属矿床(惠小朝,2014;李普涛等,2023;耿涛等,2023;张熊猫等,2023)。前人研究成果显示,该硬岩型铀多金属矿与构造断裂、岩体、脉体等关系密切,铀矿体常产于大型构造破碎带内(徐贵来等,2013;王洪作等,2016;周乾等,2019;李波,2022),具有“规模大、品位低”的特征(高成等,2015,2017)。该矿自1957年被发现以来,经多轮勘查工作,尤其是近几年的勘查工作,目前埋藏较浅和规模较大的铀矿体大部分已被探明,且在矿区及外围的基础地质研究、区域成矿背景、矿化蚀变特征以及矿石矿物学特征等方面取得了诸多成果(喻学惠,1992;郭威,2008;高成等,2015,2017;惠小朝等,2017),但在该地区攻深找盲、外围扩勘查方面进展缓慢(惠小朝等,2016),主要原因在于常规铀矿勘查的技术方法在该地区复杂地形条件下难以发挥理想的效果(郝书东,2016)。前人在华阳川铀多金属矿勘查工作中也并未总结出较好的地球物理勘探方法,主要以地面放射性测量和激电测量为主,但因受地形复杂导致地面地球物理工作开展困难、以及放射性场衰减快的特性影响,上述两种方法对深部隐伏铀矿勘查作用有限(耿涛,2023)。

2016年,中国地质调查局西安地质调查中心联合中国自然资源航空物探遥感中心在研究区开展了1:5万航空重力测量、1:1万高精度航空磁测工作以及1:5万地面重力测量,上述工作为研究华阳川脆韧性剪切带的深部延展特征,刻画华阳川铀矿矿区及外围的三维地质结构提供了可靠的高精度地球物理数据(杨海,2019;赵廷严,2020)。2017年以来,中国地质调查局西安地质调查中心在华阳川铀矿矿区

及外围部署完成了大量航空和地面地球物理工作,尤其多条大地电测深测深剖面,为华阳川铀矿区的深部找矿提供了大量基础地球物理数据。

笔者利用航空和地面重磁数据,分析了华阳川铀矿矿区及外围的重磁场特征,查清了华山岩体、老牛山岩体及华阳川韧性剪切带的分布特征,并根据不同勘探深度的地球物理探测剖面,深入研究了华阳川韧性剪切带的深部构造特征,结合以往地质资料及铀源的物质来源及成矿规律研究,讨论了华阳川铀矿矿区的深部找矿潜力。

## 1 矿区地质

华阳川铀多金属矿赋存于华山岩体和老牛山岩体夹持的太华岩群( $Ar_2th$ )深变质岩系中,主要由TTG片麻岩套和表壳岩系组成,变质作用达高角闪岩相和麻粒岩相(图1)。主要岩性有花岗片麻岩、黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩以及含辉石角闪斜长片麻岩等,并包含有石英岩、石英片岩及大理岩透镜体等。

矿区断裂发育,控矿构造为华阳川韧性剪切带,形成了NW-SE向裂隙密集带,裂隙多被不同类型的脉岩、矿脉充填,褶皱主要是由片麻理构成的层间褶皱。矿区岩浆岩种类较多,以岩脉为主,呈脉状形式沿构造断裂贯入在太华群变质岩中,主要有碳酸岩脉、伟晶岩脉、煌斑岩脉、细粒花岗岩等(惠小朝等,2014;高成等,2017)。

## 2 矿区地球物理特征

### 2.1 物性特征

物性是连接地球物理与地质的纽带和桥梁,岩石的物性差异是物探工作的前提,因此系统采集和研究

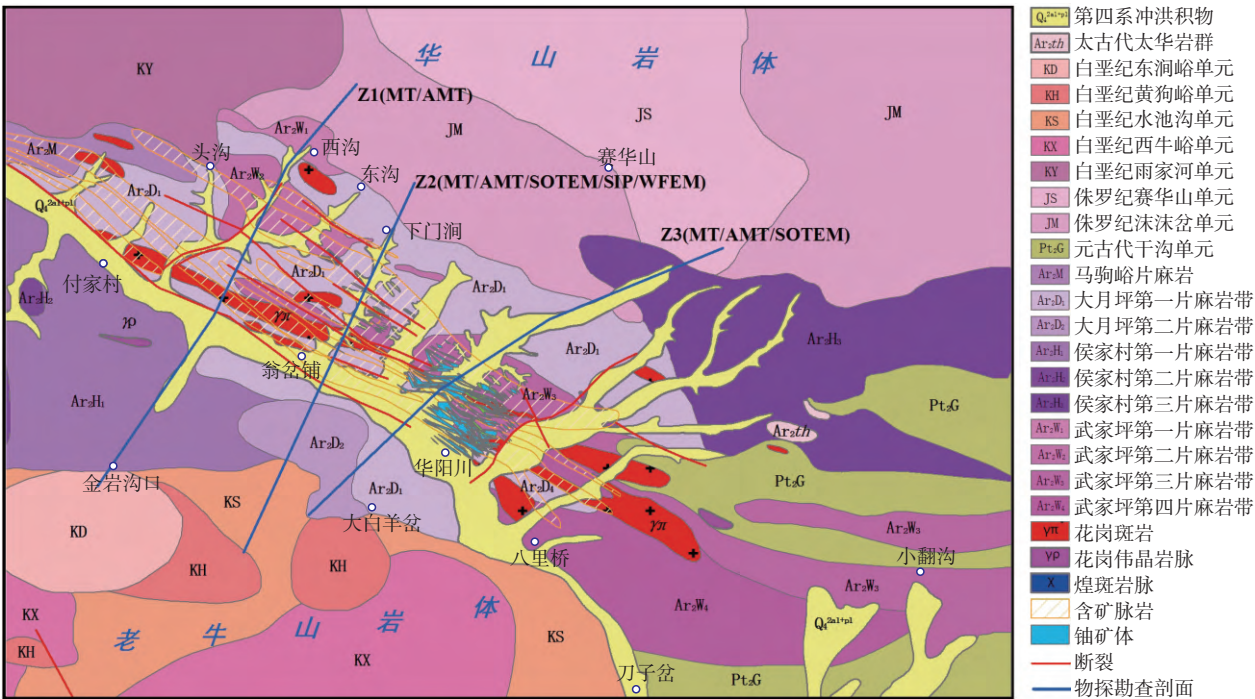


图1 华阳川铀矿区地质简图

Fig. 1 Geological map for the Huayangchuan region

区岩石的密度和磁性参数是分析解释异常十分重要的工作。本次共采集了 1 168 块密度(磁性)标本, 统计燕山期、元古期、太古期侵入岩和元古界部分变质岩地层的密度和磁化率特征(表 1)。

表 1 地层、岩体密度及磁化率统计表

Tab. 1 Statistical table of formation, rock mass density and susceptibility

期次	代号	岩 性	块 数	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	密度均值 (g/cm <sup>3</sup> )	磁化率 (10 <sup>-5</sup> SI)	磁化率 均值 (10 <sup>-5</sup> SI)	地段密度 均值 (g/cm <sup>3</sup> )
燕山期	KX	中细粒含斑黑云二长花岗岩	31	2.51~2.61	2.56	128~740	500	老牛山
	KS	细粒含斑黑云二长花岗岩	18	2.60~2.71	2.65	162~4380	1584	
	KH	中粒含斑黑云二长花岗岩	32	2.50~2.68	2.57	11~1728	458	
	KD	中粗粒含斑黑云二长花岗岩	18	2.58~2.70	2.63	740~4333	1974	华山
	KY	中粒黑云二长花岗岩	38	2.52~2.63	2.56	525~1388	960	
	KC	细粒黑云二长花岗岩	31	2.51~2.70	2.62	41~1438	719	
	JM	细粒角闪黑云二长花岗岩	31	2.55~2.66	2.61	512~1095	791	
中元古期	Pt <sub>2</sub> G	细粒二长花岗岩	47	2.53~2.67	2.60	237~1855	1115	塬头 2.60
太古期	Ar <sub>2</sub> D	花岗片麻岩	157	2.58~2.86	2.68	16~881	386	华阳川韧性 剪切带 2.65
	Ar <sub>2</sub> H	黑云角闪斜长片麻岩	46	2.60~2.70	2.65	13~518	162	
	Ar <sub>2</sub> W	辉石角闪片麻岩	74	2.54~2.66	2.62	219~1660	1171	
蓟县系	Jxl	浅灰色白云岩	32	2.81~2.87	2.83	1~3	2	桃园以南
长城系	Chch	泥质板岩、石英砂岩	63	2.60~2.91	2.74	1~5	3	
	Chb <sup>4</sup>	灰白色石英砂岩	185	2.36~2.80	2.59	1~11	4	
	Chl <sup>1</sup>	墨绿色细碧岩	101	2.82~2.91	2.85	351~7915	5467	金堆矿区
太华群	Chd	石英角斑岩(含黄铁、辉钼矿)	63	2.59~2.94	2.72	2~510	100	
	Ar <sub>2</sub> th	黑云斜长片麻岩、混合岩			2.68		1460	

### 2.1.1 侵入岩体

燕山期的侵入岩体分布在老牛山和华山附近, 侵入时期为白垩纪、侏罗纪。老牛山岩体和华山岩体的岩性比较接近, 都为中粗粒黑云二长花岗岩, 密度值为  $2.50 \sim 2.71 \text{ g/cm}^3$ , 均值为  $2.60 \text{ g/cm}^3$ 。两岩体在磁性方面都具有弱磁性, 老牛山岩体磁化率均值为  $900 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 华山岩体磁化率均值为  $800 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 但在老牛山中心部位的 KD、KS 含斑黑云二长花岗岩磁性均值为  $1779 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 其磁化率比华山岩体明显偏强, 反映两大岩体的磁性存在一定的差异。

元古期的侵入岩体分布在工区中东部源头-后沟一带, 岩性为细粒二长花岗岩, 密度值为  $2.60 \text{ g/cm}^3$ , 磁化率均值为  $1115 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 表明其具有弱磁特性。

太古期的侵入岩体分布在工区北部华阳川-马莲一带, 岩性为花岗片麻岩、斜长片麻岩等, 平均密度值为  $2.63 \text{ g/cm}^3$ , 磁化率均值为  $573 \times 10^{-5} \text{ SI}$ 。太古期的侵入岩体密度值比燕山期、元古期略高点, 并且有弱磁特性。但是, 太古期的花岗片麻岩之间也存在比较大的差异, 特别是大月坪片麻岩 ( $\text{Ar}_2\text{D}$ ), 其变化范围在  $2.58 \sim 2.86 \text{ g/cm}^3$ , 平均密度值达  $2.68 \text{ g/cm}^3$ , 与同类相比, 岩石致密, 铁镁矿物含量高等特点, 因此密度高于其它同期次侵入体, 若同花岗岩接触可形成局部重力高异常。

### 2.1.2 沉积地层

研究区及外围出露的地层主要为元古界长城系 (Ch) 和蓟县系 (Jx), 太华群有零星出露。长城系下部为基性火山岩 (Ch<sub>1</sub>) 建造, 岩性以细碧岩、凝灰岩为主, 密度均值为  $2.85 \text{ g/cm}^3$ 、磁化率均值为  $5467 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 具有高密度、中等磁的特性; 上部 (Ch<sub>2</sub>) 为沉积变质岩

系, 以厚层石英砂岩、板岩等, 密度均值为  $2.59 \text{ g/cm}^3$ 、磁化率均值为  $4 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 具有低密度、无磁的特性。蓟县系 (Jx) 为浅变质岩, 以中厚层白云岩为主, 密度均值为  $2.83 \text{ g/cm}^3$ 、磁化率均值为 3, 具有高密度、无磁的特性。太华群中的片麻岩及混合岩, 其密度均值为  $2.68 \text{ g/cm}^3$ 、磁化率均值为  $1460 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 具有中等密度、有磁的特点。另外, 长城系东坪组部分标本含矿, 因此密度值变化范围比较大, 在  $2.59 \sim 2.94 \text{ g/cm}^3$  之间, 实际石英斑岩密度为  $2.70 \text{ g/cm}^3$ 。

综上所述, 可知: ①地层与侵入岩之间有明显的密度差异, 长城系和蓟县系的平均密度约为  $2.75 \text{ g/cm}^3$ , 侵入岩以酸性为主, 密度值约为  $2.60 \text{ g/cm}^3$ , 其密度差达  $0.15 \text{ g/cm}^3$ , 在一定规模下重力异常能够识别。②地层与侵入岩之间也有磁性差异, 长城系洛源组磁化率均值为  $3378 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 属中等磁性, 燕山期侵入岩分布广, 磁化率均值为  $1000 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 属弱磁性; 高山河群及蓟县系基本无磁。③不同期次的酸性侵入岩之间存在一定的密度差异, 也具备微弱的磁性差异。燕山晚期侵入岩虽然与太古代侵入岩成分相似, 平均密度的差值为  $0.05 \text{ g/cm}^3$ , 差异不大, 但在华阳川一带, 与大月坪片麻岩 ( $\text{Ar}_2\text{D}$ ) 相比, 密度差大于  $0.1 \text{ g/cm}^3$ , 对圈定华阳川韧性剪切带与燕山期侵入岩分布范围提供了物性前提。

### 2.2 地球物理场特征

从区域布格重力异常图 (图 2a) 和航磁  $\Delta T$  化极图 (图 2b) 可知, 重力场和磁场总体表现为 NE 向异常带中走向各异、大小不等的局部重磁异常。其中以东坪-老爷岭沟-拴马桩为界, 以西主要为低重力、高磁

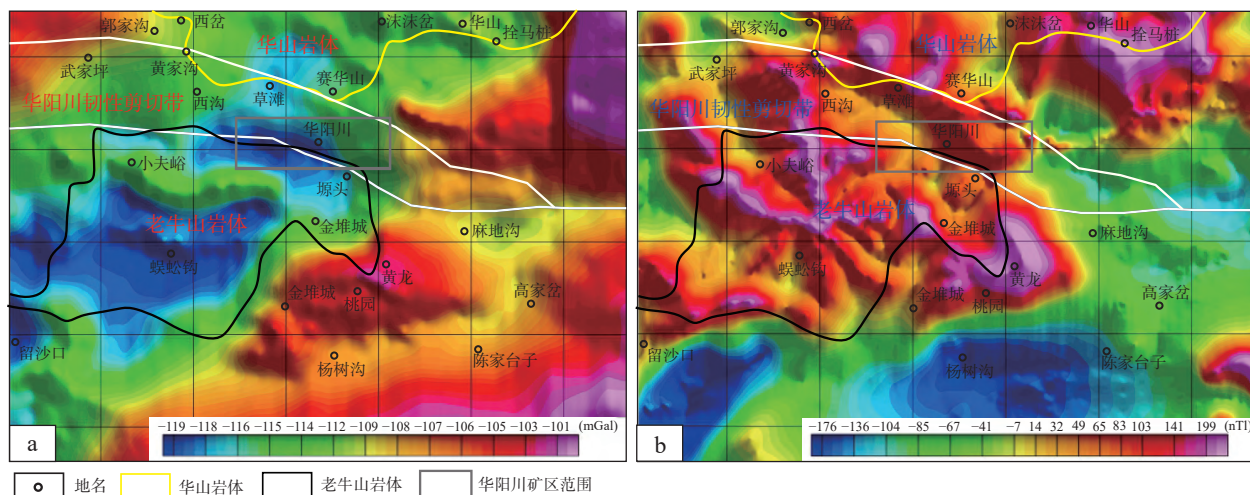


图2 研究区剩余重力异常图(a)和化极磁力异常图(b)

Fig. 2 (a) Residual gravity and (b) reduction to the pole (RTP) maps of magnetic anomalies in the study area



力异常区,布格重力异常值为 $-120\times 10^{-5}\sim -107\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ ,航磁 $\Delta T$ 值为 $-140\sim 350\text{ nT}$ 。异常带内分布着较多的大小不等、形状各异、走向不同的局部重力异常,反映了不同的地质体及空间展布特征。金岩沟、蜈蚣沟一带是研究区重力值最低的区域,也是重力异常变化最大、本次研究最为关注的地段,主要反映了老牛山岩体和华山岩体的空间展布及物性变化特征。总体显示老牛山岩体的重力异常较华山岩体规模大、数值低,反映老牛山岩体相对分布范围和埋深大于华山岩体。

老牛山岩体整体表现为NE向展布的局部重力低,从北到南可分为3个重力低异常带,同时受近SN向构造的影响,局部重力异常呈SN向展布的特征。北部重力低异常带长为6 km、宽为1.5 km,同时被近SN向的重力低异常穿插,使得北部重力低异常带表现为T型展布特征;中部重力低异常带最为醒目,长为12 km、宽为1.7 km;南北重力低异常带长为12 km、宽为3 km,由3个东西向排列的局部异常组成,特别是东边的两个局部重力低异常呈SN向展布的特征。推测老牛山岩体在侵入时深部受近EW向区域断裂控制,呈近EW向展布,但在浅部受后期SN向推覆构造影响,使得老牛山岩体在近地表整体SN向拉伸,在地表呈等轴状出露。

老牛山岩体的磁场值变化也较大,航磁 $\Delta T$ 最高值位于蜈蚣沟—金岩沟南一带,最低值位于西南部寺家坪;磁异常的展布总体与老牛山岩体和华山岩体的出露区对应,老牛山岩体表现为磁力高背景下的条带状局部磁力高异常,而华山岩体则表现为团块状的局部磁异常;部分磁异常分布在太华岩群出露区,认为这些地段可能有隐伏中生代花岗岩体。

夹持在华山岩体和老牛山岩体之间的华阳川韧性剪切带表现为重力低异常和重力梯级带特征,航磁异常图上显示为中高磁异常,走向为北西西向,华阳川钼多金属矿床位于布格重力异常的梯级带和中高磁异常异常上,结合地面华阳川韧性剪切带内物性标本统计结果,认为该处重磁异常为韧性剪切带内的太华岩群引起,异常走向和大小反映了华阳川韧性剪切带的走向和规模,推断韧性剪切带南北宽从几米至两三千米,且剪切带向下有较大延伸。

综上所述,老牛山和华山岩体的重磁场较好地反映了酸性岩体的空间展布特征,同时与地面地质资料对比可见,这些岩体地表出露和地下分布有较大差异。此外,华阳川钼多金属矿床的控矿构造华阳川韧性剪

切带也为低重力异常、中高磁异常特征,虽与周围岩体有相似的重磁异常特征,但是所表现的异常形态迥异。

### 3 基于地球物理场的深部构造特征

2018~2019年,中国地质调查局西安地质调查中心在华阳川钼矿区实施完成了大地电磁测深、广域大地电磁法、音频大地电磁测深(AMT)、短偏移距瞬变电磁、频谱激电测深(SIP)5种电法勘查,其剖面位置见图1。其中,矿区Z2剖面为典型剖面,先后部署完成了重力测量、地面磁测剖面、频谱激电测量(SIP)、短偏移距瞬变电磁法(SOTEM)、音频大地电磁测深(AMT)、大地电磁测深(MT)、广域大地电磁法(WFEM)工作,为研究区华阳川韧性剪切带的空间分布和深部特征提供了可靠的数据支撑。

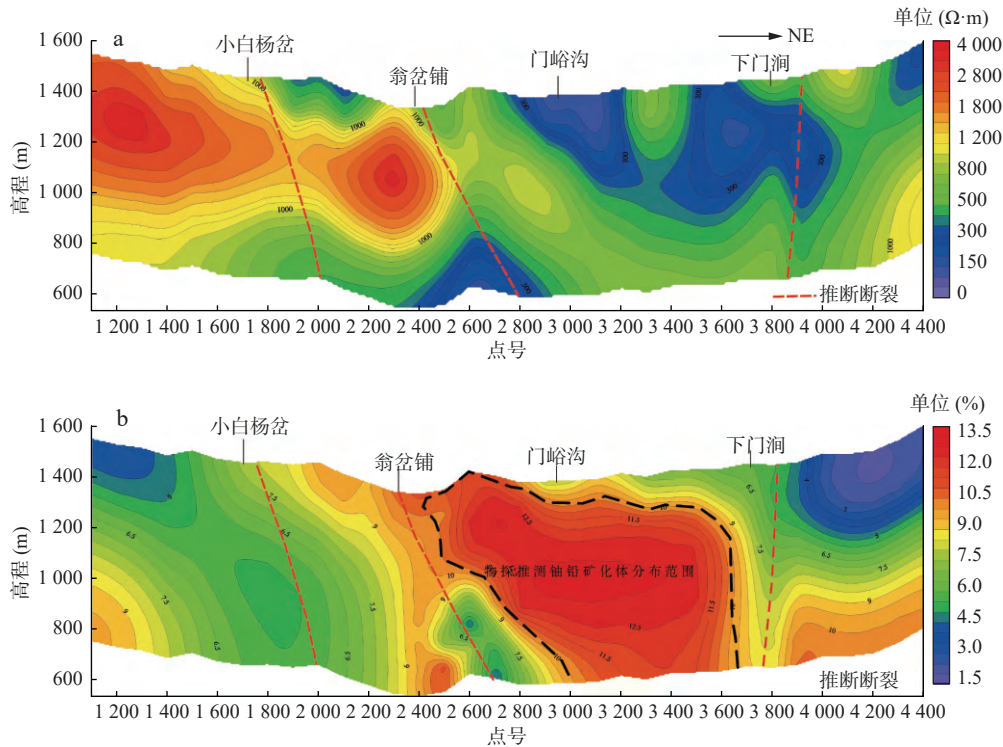
华阳川韧性剪切带是华阳川钼多金属矿床的主要控矿构造,表现为宽大的脆—韧性断裂带,该断裂东西两端延伸出矿区,总体走向为 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$ ,倾向NE,倾角为 $30^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。断裂具有多期活动性和力学性质多次转换特点。同位素定年研究确认华阳川韧性剪切带及其相应的构造变形是发生于417~419 Ma的加里东事件的产物。通过横跨该控矿构造的地球物理剖面,可知其地下构造的深部构造特征如下(图3):

#### 3.1 电阻率分布特征

Z2剖面SIP法反演结果显示(图3a),SIP法电阻率分布特征较为明显,剖面以翁岔铺(华阳川河)为界,电阻率呈现出南高北低特征。剖面南部电阻率以高值为主,电阻率幅值为 $400\sim 4\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ ,横向上高阻以小白杨岔为界被分割为两部分,幅值相近,变化较小;在小白杨岔至翁岔铺、标高1250~1450 m处以及翁岔铺至门峪沟、标高500~900 m处分布两处局部低阻,电阻率幅值为 $100\sim 600\ \Omega\cdot\text{m}$ ,其中深部的低阻异常等值线向下未封闭且范围有增大趋势。剖面北部以低阻为主,局部中高阻镶嵌于低阻异常之中,整体电阻率值低于 $600\ \Omega\cdot\text{m}$ 。整条剖面电阻率等值线显示为北倾特征。

#### 3.2 极化率分布特征

由极化率反演断面图可以看出(图3b),极化率异常可分为3段,分别位于翁岔铺以南、翁岔铺以北至下门涧、下门涧以北,总体呈现两侧低中间高的分布特征;幅值范围介于2%~13%,等值线北倾特征明显。以极化率值10%为下限,整个断面上可划分出一个规



a. 视电阻率反演断面图；b. 视极化率反演断面图

图3 Z2剖面SIP法反演结果

Fig. 3 Inversion results of the SIP method for the Z2 profile

模较大的高值异常。该异常位于翁岔铺至下门洞、标高介于600~1400 m, 异常呈现囊状, 形态规则, 强度高, 极值达13%, 分布范围大, 异常中心等值线稀疏且封闭, 异常向下有收敛趋势但未圈闭; 推断异常为铀铅矿化所致。

结合地质资料及物性资料, 推断高阻低极化异常为二长花岗岩(老牛山岩体), 可以看出老牛山岩体在地表以下一定深度内向华阳川韧性剪切带有一定的延伸和挤压; 低阻高极化异常反映了韧性剪切带的深部分布形态, 并且认为该韧性剪切带往深部继续有延伸, 为深部找矿提供了地球物理依据。

### 3.3 密度及电阻率深部分布特征

鉴于上述SIP电阻率剖面显示的矿区深部低阻异常向下未封闭且范围有增大趋势, 同剖面部署了探测深度较深的大地电磁测深(MT)和广域大地电磁法工作, 从Z2剖面上的大地电磁测深(MT)结果可见, 华阳川韧性剪切带向下有较大的延伸, 但细节不是很清楚(图4), 在Z1、Z3的MT电磁测深剖面上华阳川韧性剪切带也有清晰显示, 电阻率特征与Z2剖面类似, 揭示了华阳川韧性剪切带的平面规模足够大, 深度延伸较深。

与大地电磁测深剖面相比, 广域大地电磁法测量

的细节更为丰富, 探测深度更深, 较好地刻画了华阳川韧性剪切带的深部特征。利用剩余重力异常进行矿区三维密度反演, 获取Z2剖面的重力密度反演剖面。对比广域大地电磁法电阻率结果, 两者具有高度吻合的对应关系, 两种反演结果互为佐证(图5)。

由密度反演断面图可以看出(图5a), 密度可分为3段, 低密度体为第四系冲洪积物、韧性剪切带内造分化、破碎的太华岩群, 中等密度地质体为老牛山岩体和华山岩体二长花岗岩, 高密度地质体为大月坪片麻岩及深部为分化的太华岩群, 其中华阳川韧性剪切带与围岩老牛山岩体、华山岩体具有明显密度界面。

广域大地电磁法二维视电阻率反演结果显示(图5b): 华山岩体和老牛山岩体反映为高阻块体, 华阳川韧性剪切带及被剪切带破坏、切割的太华岩群为低阻异常; 剪切带与南北两侧的侵入岩体具有清晰的电性分界。

综上所述, 华阳川韧性剪切带为低阻、高极化、低密度、中高磁性的地球物理特征, 大致呈漏斗形, NW向, 长约为9 km, 宽约为2 km。华阳川韧性剪切带在标高-500~-1500 m时开始收口变窄, 宽度约800 m。从地表到深度2000 m(标高为-500 m), 华阳

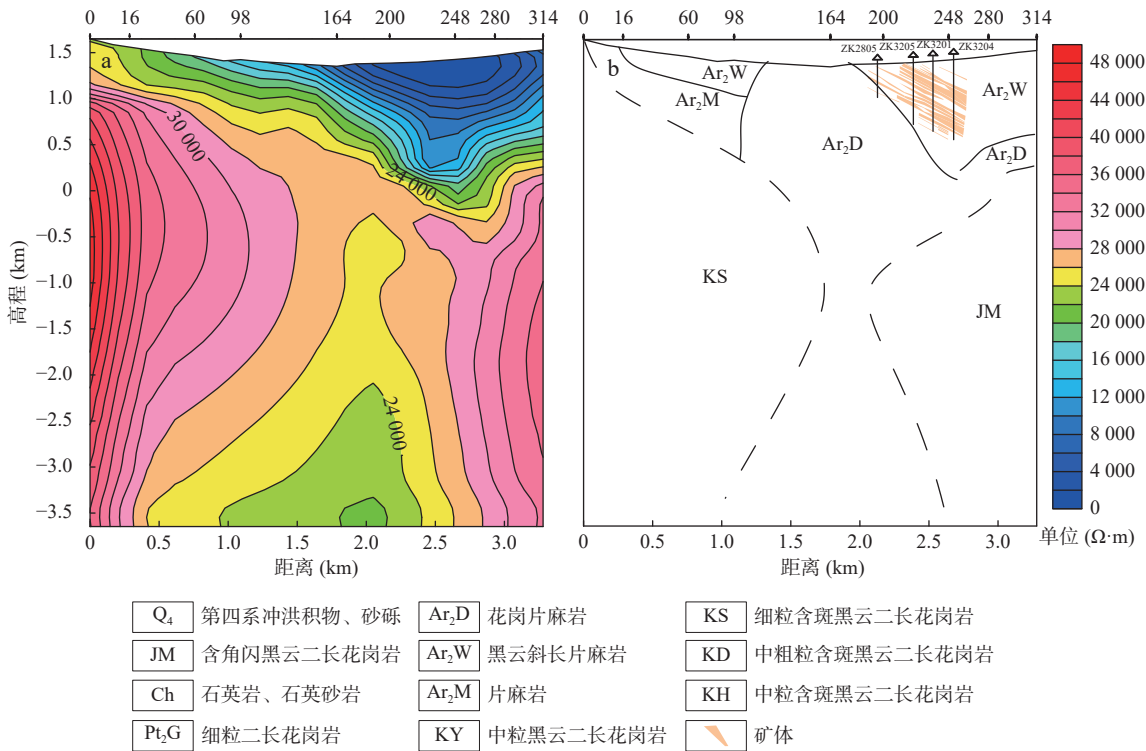


图4 Z2剖面MT电阻率反演剖面图(a)及地质解释图(b)

Fig. 4 (a) MT resistivity and (b) geological interpretation map of Z2 profile

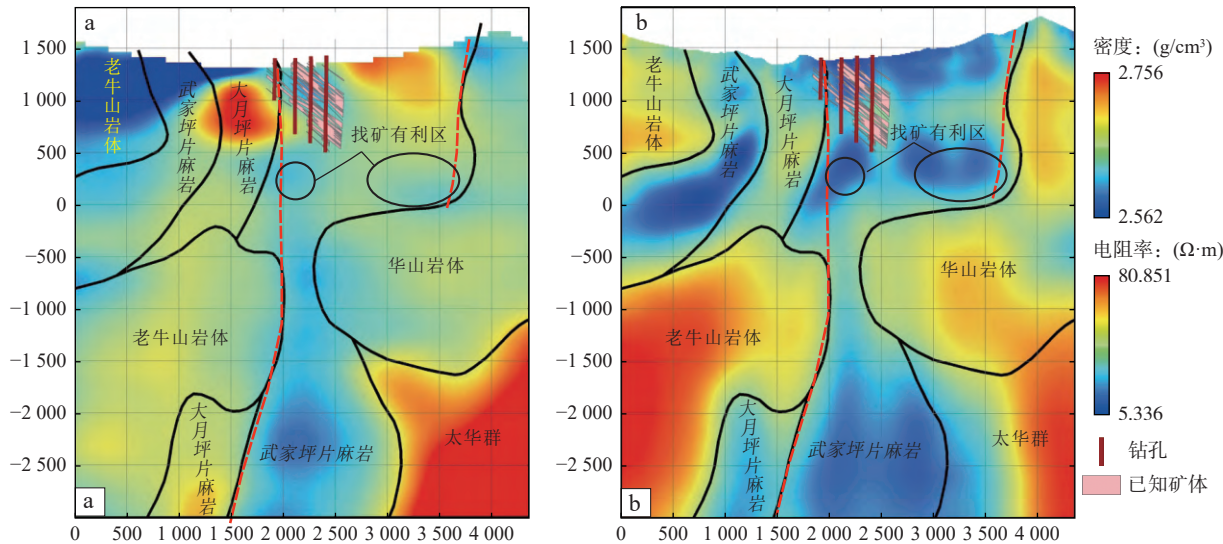


图5 华阳川 Z2 剖面反演密度图(a)和电阻率图(b)

Fig. 5 (a) Inverse density and (b) resistivity maps of the Z2 section in Huayangchuan

川韧性剪切带的地球物理特征几乎未变,说明华阳川韧性剪切带至少延伸至标高-3 000 m,为华阳川铀矿区深部找矿提供依据。

#### 4 深部铀矿找矿潜力

张熊猫等(2023)通过系统收集航放、地质、钻探、

选冶试验等资料,采用地表放射性物探、地质、锆石 U-Pb 定年等手段,计算各地质体(单元)的放射性能谱特征、年龄特征,研究岩体、脉岩的构造展布规律和放射性元素的迁移规律,对华阳川铀矿的成矿物质来源进行了研究。地表伽玛能谱特征显示,华山岩体翁峪花岗岩 U 含量为  $4.82 \times 10^{-6} \sim 6.46 \times 10^{-6}$ , Th 含量  $23.03 \times 10^{-6} \sim 31.08 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 5.29 : 6.00; 老牛山岩体主

要岩石单元 U 含量为  $9.27 \times 10^{-6} \sim 11.18 \times 10^{-6}$ , Th 含量为  $24.39 \times 10^{-6} \sim 27.72 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 2.64 : 3.55, 两者均具有高 U、高 Th 特征; 地球化学特征显示华山岩体与老牛山岩体同具有埃达克质岩的特征, 为不同期次的同源富铀体, 但华山岩体翁峪花岗岩具典型铀源(铀迁出)特征; 放射性航空物探特征显示, 华阳川矿区韧性剪切带中具有铀迁入富集特征; 对地质年代背景研究显示华山岩体翁峪花岗岩与华阳川矿区含石英碳酸岩成岩年龄基本一致, 均形成于 235~200 Ma; 构造背景研究显示第一次造陆事件(约 1 800 Ma)至印支期形成的多期次脆韧性剪切带底部直接与华山岩体连通, 为活化铀的迁移提供了有利通道, 华山岩体翁峪花岗岩中的铀元素被活化、迁移后, 为华阳川铀矿提供了大量的铀源。

结合华阳川铀矿区深部构造特征和铀矿成矿物质来源及铀迁移规律研究, 认为在已知华阳川矿体的正下方区域标高为 0~600 m, 东西长约为 1 000 m, 南北方向为已知矿体正下方向南 1 500 m 的范围内, 具有进一步找矿的空间。

根据地面地质资料、已知钻孔和地球物理推断解释结果可知, 该区域主要为太华岩群武家坪片麻岩, 经多期构造变形变质作用叠加改造与再造, 形成了黑云斜长片麻岩、含角闪黑云斜长片麻岩、花岗片麻岩、条带状、眼球状黑云斜长片麻岩等多相片麻岩组合, 且不同程度发育混合岩化; 夹于华阳川脆韧性剪切带内, 剪切带内裂隙主要以走向 NNW、NW 向为主, 这两组裂隙规模较大、深部延伸至少 2 000 m 深, 且在标高 0 m 附近, 剪切带受华山岩体和老牛山岩体侵入挤压变窄。标高 0 m 附近, 剪切带与北侧华山岩体接触带部位形成向南的靠椅状平面区域, 有利于铀源富集。华阳川韧性剪切带含矿岩石与围岩比较, 具低阻、高极化、低密度、中高磁性的地球物理特征。穿华阳川矿区 Z2 剖面重磁及激电、电磁法综合反演结果显示: 华阳川韧性剪切带呈漏斗形(图 5), NW 走向, 东西长为 6 km, 南北宽从几十米到 2 000 m(地质填图认为小于 1 000 m)。华阳川韧性剪切带在标高 -500~-1 500 m 时宽度变窄至 800 m。华阳川矿区目前勘探深度 800 m, 从地表到深度 2 000 m, 华阳川韧性剪切带的地球物理特征几乎一致(郭培虹, 2021)。华山岩体在华阳川矿区北界面变缓, 使得华阳川铀矿的主要铀源体—瓮峪花岗岩中的铀源迁移的通道更顺畅、迁移距离更短, 有利于铀源富集就位。据此推断华阳川矿区深部至少

1 500 m 内仍具有寻找铀矿的巨大潜力。

## 5 结论

(1) 华阳川韧性剪切带表现为低阻、高极化、低密度、中高磁性的地球物理特征, 通过多种电法勘查手段的综合应用, 揭示了华阳川韧性剪切带的深部延伸特征, 证实其为铀源迁移提供了通道。

(2) 华山岩体和老牛山岩体具有高 U、高 Th 特征, 且两者为同源富铀体, 但华山岩体具有铀源迁出特征。

(3) 华阳川韧性剪切带的漏斗形特征, 华山岩体在华阳川矿区北界面的变缓以及剪切带内裂隙的发育等因素, 均有利于铀源富集就位, 认为华阳川铀矿区深部至少 1 500 m 内仍具有寻找铀矿的巨大潜力。

致谢: 感谢各位审稿专家提出的宝贵意见!

## 参考文献(References):

- 高成, 康清清, 张熊猫, 等. 华阳川碳酸岩的岩石学特征及铀矿赋存状态[J]. 陕西地质, 2015, 33(2): 10-13.
- GAO Cheng, KANG Qingqing, ZHANG Xiongmao, et al. Uranium Occurrences And Carbonatite Petrology In Huayangchuan[J]. Geology Of Shaanxi, 2015, 33(2): 10-13.
- 高成, 康清清, 江宏君, 等. 秦岭造山带发现新型铀多金属矿: 华阳川与伟晶岩脉和碳酸岩脉有关的超大型铀-钼-铅-稀土矿床[J]. 地球化学, 2017, 46(5): 446-455.
- GAO Cheng, KANG Qingqing, JIANG Hongjun, et al. A Unique Uranium Polymetallic Deposit Discovered In The Qinling Orogenic Belt: The Huayangchuan Super-Large U-Nb-Pb-REE Deposit Associated With Pegmatites And Carbonatites[J]. Geochimica, 2017, 46(5): 446-455.
- 耿涛, 郭培虹, 冯治汉, 等. 北秦岭华阳川地区复杂地形条件下隐伏硬岩型铀矿的地球物理勘查方法[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 225-244.
- GENG Tao, GUO Peihong, FENG Zhihan, et al. Geophysical Exploration Eethod of Concealed Hard Rock Type Uranium Deposit with Complex Topographic Conditions in Huayangchuan Area, North Qinling Mountains[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 225-244.
- 郭培虹, 冯治汉, 王万银, 等. 北秦岭华阳川地区重磁三维反演及岩浆岩特征研究[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1217-1225.
- GUO Peihong, FENG Zhihan, WANG Wanyin, et al. Three-dimensional gravity and magnetic inversion of magmatic rocks in the Huayangchuan, North Qinling area[J]. Geophysical & Geo-



- chemical Exploration, 2021, 45(5): 1217–1225.
- 郭威, 周鼎武, 任军锋, 等. 陕西小秦岭华阳川韧性剪切带的特征及其区域构造意义[J]. 地质通报, 2008, 27(6): 823–828.
- GUO Wei, ZHOU Dingwu, REN Junfeng, et al. Characteristics of the Huayangchuan ductile shear zones in the Xiaoqinling Mountains, Shaanxi, China, and its regional tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(6): 823–828.
- 郝书东, 王先超, 杜文龙, 等. AMT 法指导铜矿深部勘查的可行性[J]. 西北地质, 2016, 49(4): 165–171.
- HAO Shudong, WANG Xianchao, DU Wenlong, et al. Feasibility Analysis of Audio magnetotelluric Method for Guiding the Copper Prospecting in Depth[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(4): 165–171.
- 惠小朝, 蔡煜琦, 何升, 等. 陕西省华阳川铀钍矿床碳酸岩岩石学及地球化学特征[J]. 现代地质, 2017, 31(2): 246–257.
- HUI Xiaochao, CAI Yuqi, HE Sheng, et al. Petrologic and geochemical characteristics of carbonatites in Huayangchuan U-Nb-Pb deposit, Shaanxi Province[J]. Geoscience, 2017, 31(2): 246–257.
- 惠小朝, 何升. 华阳川铀多金属矿床碳酸岩脉矿化特征[J]. 铀矿地质, 2016, 32(2): 93–98.
- HUI Xiaochao, HE Sheng. Mineralization Characteristic of Carbonatite Veins in Huayangchuan U-polymetal Deposit, Shanxi Province[J]. Uranium Geology, 2016, 32(2): 93–98.
- 惠小朝, 李子颖, 冯张生, 等. 陕西华阳川铀多金属矿床铀赋存状态研究[J]. 矿物学报, 2014, 34(4): 573–580.
- HUI Xiaochao, LI Ziyang, FENG Zhangsheng, et al. Research On The Occurrence State Of U In The Huayangchuan U-Polymetallic Deposit, Shaanxi Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2014, 34(4): 573–580.
- 李波, 王朋, 冉军林, 等. AMT 在陕西华阳川地区硬岩型铀矿勘查中的应用[J]. 高校地质学报, 2022, 28(3): 451–456.
- LI Bo, WANG Peng, RAN Junlin, et al. An Audio-Frequency Magnetotellurics (AMT) Investigation of Hard Rock-Hosted Uranium Deposit in Huayangchuan Area, Shaanxi Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2022, 28(3): 451–456.
- 李普涛, 辜平阳, 何世平, 等. 小秦岭华阳川地区铀矿综合找矿方法研究[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 245–259.
- LI Putao, GU Pingyang, HE Shiping, et al. Study on Exploration Methods Combination for Uranium Deposit in the Periphery of Huayangchuan Area, Xiaoqinling Mountains[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 245–259.
- 王洪作, 吴俊奇, 陈培荣, 等. 大桥坞产铀火山—侵入杂岩的岩浆混合作用及其对赣杭构造带铀成矿潜力的指示意义[J]. 高校地质学报, 2016, 22(1): 30–42.
- WANG Hongzuo, WU Junqi, CHEN Peirong, et al. Uranium-bearing Volcanic-intrusive Complexes in the Daqiaowu: Magma Mixing and Implications for Uranium Metallogenic Potential in the Gan-Hang Tectonic Belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(1): 30–42.
- 徐贵来, 王华林, 赵瑞全, 等. 铀资源勘查物化探方法最新进展及发展趋势[J]. 铀矿地质, 2013, 29(6): 344–351.
- XU Guilai, WANG Hualin, ZHAO Ruiquan, et al. Latest Advancement And Developing Trend Of Geophysical And Geochemical Methods And Techniques Applied In Uranium Resources Exploration[J]. Uranium Geology, 2013, 29(6): 344–351.
- 杨海, 赵廷严, 李诗珺, 等. 秦岭华阳川地区航空伽马能谱异常特征及铀找矿方向[J]. 中国地质, 2019, 46(3): 651–661.
- YANG Hai, ZHAO Tingyan, LI Shijun, et al. Anomaly characteristics of airborne gamma-ray spectrometric survey and uranium prospecting direction in Huayangchuan, Qinling[J]. Geology in China, 2019, 46(3): 651–661.
- 喻学惠. 陕西华阳川碳酸岩地质学和岩石学特征及其成因初探[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1992, 17(2): 156–157.
- YU Xuehui. Geological and petrological characteristics and genesis of carbonate rocks in Huayangchuan, Shaanxi Province[J]. Earth Sciences - Journal of China University of Geosciences, 1992, 17(2): 156–157.
- 张熊猫, 陈冰, 陈军, 等. 北秦岭华阳川地区铀矿物质来源[J]. 地质通报, 2023, 42(3): 1671–1684.
- ZHANG Xiongmao, CHEN Bing, CHEN Jun, et al. Source of uranium-minerals in Huayangchuan area of North Qinling[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(3): 1671–1684.
- 赵廷严, 杨海, 贾志业, 等. 航空物探指导华阳川地区铀矿找矿工作取得突破[J]. 地质论评, 2020, 66(1): 132–134.
- ZHAO Tingyan, YANG Hai, JIA Zhiye, et al. A breakthrough in Uranium prospecting achieved by an airborne geophysical survey in Huayangchuan[J]. Geological Review, 2020, 66(1): 132–134.
- 周乾, 许强平, 何金华, 等. 综合物探方法在山北地区花岗岩型铀矿勘查中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 1980–1987.
- ZHOU Qian, XU Qiangping, HE Jinhua, et al. Application Research Of Integrated Geophysical Method To Granite Type Uranium Exploration In Shanbei Region[J]. Progress In Geophysics, 2019, 34(5): 1980–1987.